



指腹部高解像吸引ディスプレイによる把持感覚の再現

第 4 報：1 指への力触覚同時提示と硬軟感提示性能の評価

一條暁生¹⁾, 森田夏実¹⁾, 永野光²⁾, 佐瀬一弥³⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

Akio ICHIJO, Natsumi MORITA, Hikaru NAGANO, Kazuya SASE, Masashi KONYO and Satoshi TADOKORO

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

2) 神戸大学 工学研究科 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

3) 東北学院大学 工学部 (〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1, sase@mail.tohoku-gakuin.ac.jp)

概要: 本稿では、一指における高解像吸引型皮膚触覚ディスプレイと力覚ディスプレイを統合することで、触覚と力覚の独立提示が可能なディスプレイを開発した。指腹部にかかる反力及び接触面圧力分布をシミュレーションによりリアルタイムで計算し、ディスプレイに反映させる事で力触覚を提示する。硬軟感提示実験では触覚、力覚のみを提示した場合と力覚と触覚を同時に提示した場合を比較することで、力触覚統合の評価を行った。

キーワード: 力触覚統合, 触覚, 吸引刺激

1. 緒言

ヒトの把持・操りに関する皮膚感覚機能を明らかにすることは、ロボットハンドに有効な触覚センサの設計やリモート操作での感覚フィードバック技術などに重要な知見を与えると期待される。ヒトは物体を把持・操るとき、物体の変形や外力に対して把持力や把持位置の調節運動を行うことで安定した把持を可能にしている。把持・操りの知覚には、把持物体と皮膚との接触面積や面内圧力といった体表面で取得される皮膚感覚と、身体位置や力といった筋肉や腱で取得される深部感覚が関わっており、知覚のメカニズムの解明には皮膚感覚と深部感覚を同時提示可能なディスプレイが必要である。

従来研究として、Gabardi らはプレートを指先に押し付けることで力覚と接触状態を再現した [1]。Solazzi らは 2 指に対してプレートの押し付けることで立体物の知覚を可能にした [2]。また Suga らは電気刺激を用いることで力覚と触覚の刺激を再現した [3]。しかし、接触面の皮膚感覚を高密度に制御できる力触覚統合ディスプレイはこれまで実現されていない。

筆者らは接触面の分布情報を提示するデバイスとして吸引刺激を用いた触覚ディスプレイを提案している [4]。小さな穴からの吸引による触覚刺激は、棒状の物体で押されたような錯覚が生じることが報告されており [5]、提案したデバイスでは 1 指 16ch の吸引によって硬軟感を再現した。さらに 1 指 16ch の触覚ディスプレイを 1 指 32ch にすることでさらなる高解像度化に成功した [6]。

本稿では触覚と力覚の独立提示可能なディスプレイの開発を目的として、1 指による高解像吸引型皮膚触覚ディスプ

レイと力覚ディスプレイの統合について報告する。提示性能を検証するために物体の硬軟感について皮膚感覚・深部感覚の寄与割合を求めて、従来研究と比較することで力触覚統合の性能を検証する。

2. 触覚提示手法

2.1 シミュレーション

柔軟物モデルと指先モデルの接触力分布をリアルタイムで計算し、示指に装着したディスプレイから刺激を提示する。指先モデルは計算の負荷を軽減するため剛体とした。柔軟物モデルは変形度合をヤング率によって制御する。剛体と柔軟物体間の接触シミュレーションは筆者らが提案したシステム [7] に基づいて実装されている。

2.2 力覚提示

力覚の提示には力覚提示装置である 3D Systems 社製の Phantom Premium を使用し、柔軟物モデルを押し込み動作時に発生する反力を指全体に提示する。力覚提示装置と指先の固定には 3 自由度のジンバルと図 1 に示す指先固定部を用いる。指先固定部は力覚提示が皮膚感覚提示に干渉しないよう、示指の背面から指頭と第一関節を固定する。指との接触部は、ずれ防止のため低高度シリコン材料 (AR-G1L) で造形したパーツを取り付けた。

2.3 皮膚感覚提示

皮膚感覚の提示には筆者らの提案した高解像吸引型皮膚触覚ディスプレイ [6] を使用する。3D プリンタ (キーエンス, AGILISTA-3200) を用いて低高度シリコン材料 (AR-G1L) で造形されており、指腹に 32 個の吸引ポートから吸引刺激を与え触覚を提示する。

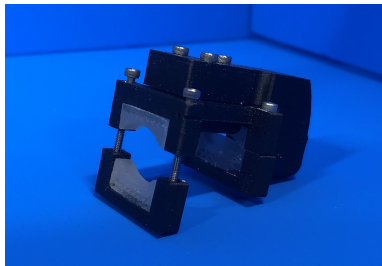


図 1: 指先固定部

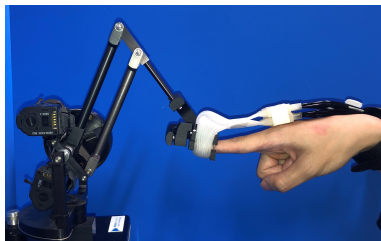


図 2: 力触覚提示ディスプレイ

3. 実験

力触覚統合による効果を評価するために恒常法による弁別実験を行った。

3.1 実験参加者

被験者は 20 代の男女計 4 名であった。実験参加者の中に触覚に関する疾患を持つ人はいなかった。本実験では利き手の示指に装置を取り付けることで実施し、参加者すべて右利きだった。

3.2 実験方法

PC の前に座り、2 種類のサイズのデバイスのうち被験者の指のサイズに合うものを利き手の示指に装着させた (図 2)。指の位置は力覚提示装置により算出される。また実験中周囲のノイズを遮断するためにピンクノイズを聞かせた。

実験は、恒常法により丁度可知差異 (JND) を求める。被験者に基準刺激と表 1 に示すヤング率の異なる 7 種類の柔軟物モデルをランダムに提示し、柔らかいモデルを回答させる。このとき基準刺激には $32(2^4)$ [kPa] のモデルを用いた。提示条件は皮膚感覚 (C 条件)、力覚 (K 条件)、皮膚感覚と力覚の統合 (I 条件) の 3 条件で行った。3 条件の提示方法ごとに 7 種類の比較を 10 回行い、合計 210 回の比較を行った。触覚情報の 3 条件の提示順は順序効果がないように調整した。被験者は 2 種類の柔軟物モデル A, B を任意に切り替えることができ、時間制限は設けないこととした。比較を終えると回答をキーボードに入力した。被験者には柔軟物モデルの上面から垂直方向に動かし、コンソール画面に表示された反力値が 5 N 以上にならない程度に触れるよう指示をした。図 3 にあるように、PC 画面の柔軟物モデルは初期形状のワイヤフレームのみが表示され、視覚情報を参考にさせないため、指先モデルが柔軟物モデルに

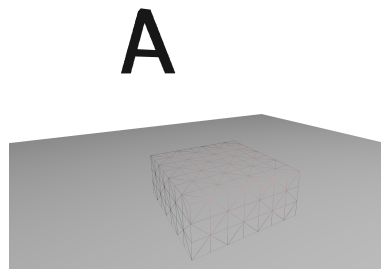


図 3: ワイヤモデル

表 1: 柔軟物モデルのヤング率

Young's moduli [kPa]
$2^{3.5}, 2^4, 2^{4.5}, 2^5, 2^{5.5}, 2^6, 2^{6.5}$

触れても変形しないように描写される。被験者には事前に I 条件による刺激の提示を行い、最も硬いモデルと最も柔らかいモデルについて、基準刺激との判別ができるまで練習した。

3.3 結果

恒常法による弁別実験の結果を図 4 に示す。なお被験者 5 人中硬さの区別ができていない 1 名は除いた。JND は知覚確率が 25 % から 75 % における刺激閾の範囲を 2 で除した値とすると、C 条件、K 条件、I 条件における JND はそれぞれ 21.2, 8.4, 10.7 [kPa] となった。弁別精度が最も高い条件は力覚単体での提示だった。

3.4 考察

力触覚統合の評価について Ernst らが複合情報における閾値の最適モデル [8] を利用して、実験結果を検証する。2 つの情報からなる複合情報の閾値 σ_I は、単一の情報の閾値 σ_C, σ_K を用いて式 (1) で示される。

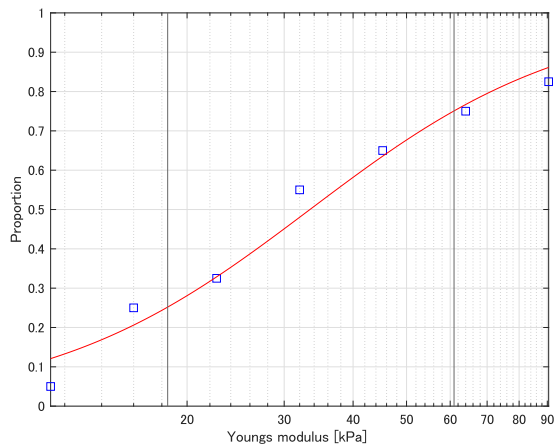
$$\sigma_I^2 = \frac{\sigma_C^2 \sigma_K^2}{\sigma_C^2 + \sigma_K^2} \quad (1)$$

実験で得られた C 条件および K 条件の JND を閾値として用いると、上記の式より I 条件の閾値は 7.8 kPa と予測される。Ernst らの最適モデルでは I 条件における閾値が、単一の情報の閾値を上回ることではなく、今回の実験結果を説明できない。一方、式 (2) で示すように、単一情報の低い閾値に複合情報が引きずられるというモデルもあり、そちらの方が高い精度で予測できたとする報告もある [9]。

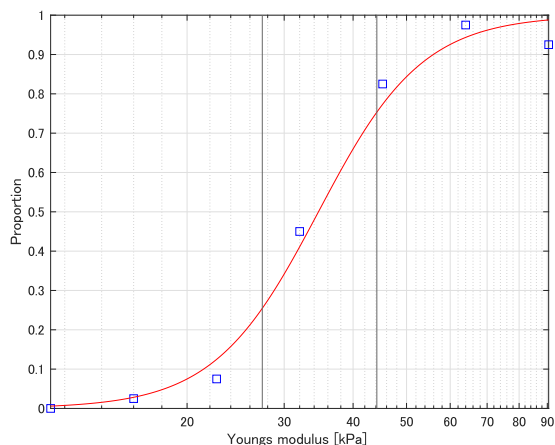
$$JND_I = \min\{JND_K, JND_C\} \quad (2)$$

今回の実験結果でも、I 条件の閾値は閾値が小さかった K 条件に近づいており、式 (2) の方が結果に近いといえる。

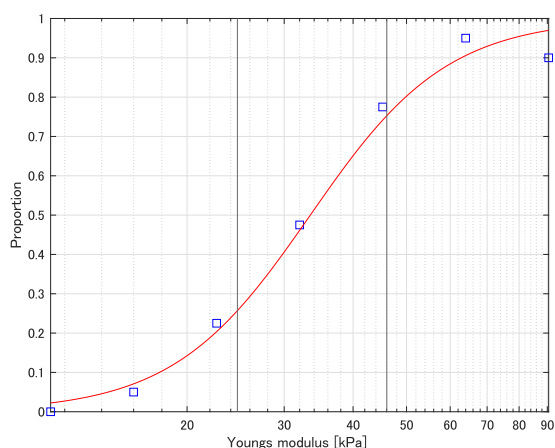
また、皮膚感覚と深部感覚の寄与について、それぞれの閾値の 2 乗の逆数に比例で示されることから、皮膚感覚は 13 %、深部感覚は 87 % と算出される。皮膚感覚と力覚の



(a) 皮膚感覚提示



(b) 力覚提示



(c) 力触覚統合提示

図 4: 実験結果

硬軟知覚に関する従来研究 [10] では、硬軟知覚の寄与率は皮膚感覚 73 %、深部感覚 27 % の割合で統合していると報告しており、実験結果と比較すると大きな差異が確認された。一般に皮膚よりも柔らかいような柔軟物の硬軟判別には深部感覚よりも皮膚感覚が重要となると考えられており、実験結果は通説に反するものとなった。

原因として現状の皮膚感覚の再現法に課題があると考えられる。本実験では指モデルに剛体を用い、接触面圧力分布に比例するように吸引圧を算出している。本実験では、剛体モデルの形状を従来よりも平坦に近い指形状に変更したこともあり、従来の比例定数のままでは、接触面の吸引刺激の差を感じにくくなっていた可能性がある。今後、圧力から吸引圧に変換する比例定数を見直す必要がある。ただし、圧覚を知覚する触覚受容器であるメルケル細胞の活動は、圧力分布でなく、皮膚内部のひずみエネルギーに相関があるとされており [11]、シミュレーションによりひずみエネルギー分布を求めて吸引刺激を生成することが望ましい。このためには、柔軟指を用いて物体と接触した際の皮膚の変形を再現する必要がある。今後、シミュレーションを柔軟指にも対応させる予定である。

4. 結言

本稿では、1 指における高解像吸引型皮膚触覚ディスプレイと力覚ディスプレイの統合について報告した。力触覚統合の性能を確認するために硬軟感弁別実験を行った。結果として、従来研究と比べて皮膚感覚による寄与率が低い結果となった。今後は、シミュレーションから吸引圧を求める手法を見直し、再実験を行う予定である。また、シミュレーションを柔軟指に対応させることも予定している。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21H04542 の助成を受けた。

参考文献

- [1] M.Gabardi, M.Solazzi, D.Leonardis, and A.Frisoli : A new wearable fingertip haptic interface for the rendering of virtual shapes and surface features, in Proc.IEEE Haptics Symp., pp. 140–146, 2016.
- [2] M.Salsedo, A.Frisoli, and M.Bergamasco : Design of a novel finger haptic interface for contact and orientation display, in Proc.IEEE Haptics Symp., pp. 129–132, 2010.
- [3] 須賀悠偉, 竹内将大, 田中叡, 梶本裕之: 皮膚電気刺激と力覚の融合による硬軟感の高品位化の検討, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2021.
- [4] H.Nagano, K.Sase, M.Konyo, and S. Tadokoro: Wearable Suction Haptic Display with Spatiotemporal Stimulus Distribution on a Finger Pad, 2019 IEEE World Haptics Conference(WHC), pp.389–394, 2019
- [5] Y.Makino, N.Asamura, H.Shinoda: Multi primitive tactile display based on suction pressure control,

- Proc. 12th IEEE Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems(Haptic Symp. '04), pp.90–96, 2004.
- [6] 森田夏美, 佐瀬一弥, 永野光, 昆陽雅司, 田所諭: 指腹部高解像吸引触覚ディスプレイによる把持感覚の再現 第1報: 高解像ディスプレイの開発と硬軟感提示性能, 第22回計測自動制御学会, 2020
- [7] H.Nagano, K.Sase, M.Konyo, and S.Tadokoro: Wearable Suction Haptic Display with Spatiotemporal Stimulus Distribution on a Finger Pad, 2019IEEE World Haptics Conference(WHC), pp.389–394, 2019
- [8] Ernst, M.O., Banks, M.S.: Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion., *Nature* 415, pp.429–433, 2002
- [9] van Beek FE, King RJ, Brown C, Luca MD, Keller S.:Static Weight Perception Through Skin Stretch and Kinesthetic Information: Detection Thresholds, JNDs, and PSEs. *IEEE Trans Haptics.* pp.20–31, 2021
- [10] B.Tiest, Wouter M.,and Kappers, Astrid M. L.: Kinaesthetic and Cutaneous Contributions to the Perception of Compressibility, *Haptics: Perception*, Springer Berlin Heidelberg, pp.255–264, 2008
- [11] M. A. Srinivasan and K. Dandekar: An investigation of the mechanics of tactile sense using two-dimensional models of the primate fingertip, *J. Biomech. Eng.*, vol. 118, no. 1, pp. 48–55, 1996.